



РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ ЗАХИСНОГО ЕКРАНА ПІД КРІВЛЕЮ КОТЕЛЬНОГО ЦЕХУ СЛАВ'ЯНСЬКОЇ ТЕС ПРИ АВАРІЙНОМУ ЗАВАЛЕННІ ПЛИТ ПОКРИТТЯ

В.П. Мущанов, Є.В. Денісов, Г.В. Зубенко

Кафедра "Теоретична і прикладна механіка", Донбаська національна академія будівництва і архітектури, вул. Державіна 2, 86123, м. Макіївка, Україна. E-mail: mvf@dgasa.dn.ua

Отримана 14 червня 2005; прийнята 22 серпня 2005

Анотація. В статті викладені основні положення методики нелінійного динамічного розрахунку гнучкої ниті при ударному діянні від падаючої маси при пружно піддатливих опорах, а також результати розрахунку конструкції захисного екрану.

Ключові слова: захисний екран, динамічний розрахунок гнучкої ниті.

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА ПОД КРОВЛЕЙ КОТЕЛЬНОГО ЦЕХА СЛАВЯНСКОЙ ТЭС ПРИ АВАРИЙНОМ ОБРУШЕНИИ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ

В.А. Мущанов, Е.В. Денисов, А.В. Зубенко

Кафедра "Теоретическая и прикладная механика", Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2, 86123, г. Макеевка, Украина. E-mail: mvf@dgasa.dn.ua

Получена 14 июня 2005; принята 22 августа 2005

Аннотация. В статье изложены основные положения методики нелинейного динамического расчета гибкой нити при ударном воздействии от падающей массы при упругоподатливых опорах, а также результаты расчета конструкции защитного экрана.

Ключевые слова: защитный экран, динамический расчет гибкой нити.

CALCULATION OF CONSTRUCTION OF SHIELD UNDER ROOF OF BOILER-ROOM SHOP OF SLAVYANSK THERMOELECTRIC POWER STATION AT COLLAPSE OF ROOF SLABS

V.P. Mushchanov, Ye. V. Denisov, G.V. Zubenko

Department of Theoretical and applied mechanics, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzhavin str. 2, 86123, Makiyivka, Ukraine. E-mail: mvf@dgasa.dn.ua

Received 14 June 2005; accepted 22 August 2005

Abstract. The article deals with the main technique of a non-linear dynamic analysis of a flexible cable at a shock influence of the falling weight at resilient supports and results of a shield construction calculation.

Keywords: A shield, dynamic analysis of a flexible cable.

Котельный цех над 8-м котлом Славянской ТЭС представляет собой одноэтажное промышленное здание пролетом 27 м, выполненное из стальных конструкций с шагом поперечных рам 6,5 м, оборудованное мостовым краном. Отметка низа стропильной фермы составляет +37,000. Здание оборудовано светоаэрационным фонарем. Покрытие цеха выполнено из мелкогабаритных железобетонных ребристых плит Р-10 по ГОСТ 514-41 [3], которые уложены по стальным прогонам кровли. По плитам покрытия уложен утеплитель из котельного шлака с объемным весом $\gamma=700$ кг/м³, выполнена цементно-песчаная стяжка 30-40мм и рубероидная кровля из 4-6 слоев, уложенных при ремонтах кровли за период эксплуатации.

Плиты покрытия находятся в аварийном состоянии, поэтому для обеспечения безопасности эксплуатации здания, а также безопасности проведения работ по замене покрытия цеха, необходимо создание защитного экрана.

Вследствие продолжительного срока эксплуатации (более 50 лет), а также малой надежности средней части плиты толщиной 25 мм, происходит разрушение бетона плиты с возможностью их дальнейшего обрушения (см. рис. 1).

В результате аварийного обрушения плиты покрытия происходит падение плиты и слоев утеплителя и гидроизоляции, находящихся на ней. Для избежания падения плиты на оборудование и персонал, находящийся в цехе, была предложена конструкция защитного экрана. Конструктивное решение экрана предложено

из системы канатов двойной свивки ЛК-Р 6,9-Г-1 (160) по ГОСТ 2688-80, закрепленных к нижнему поясу стропильных ферм с шагом 700мм. Канат не натягивается и имеет стрелу свободного провисания 150-200мм. По канатам раскатывается сетка "Рабица" $\varnothing 2,5$ мм ячейкой 48x48 мм по ГОСТ 5336-67 массой 1,71 кг/м². Сетка фиксируется к канатам проволоочной скруткой с шагом 800мм и на краях стяжкой из стальных полос. Пространственная схема расположения несущих конструкций покрытия и защитного экрана представлена на рис. 2.

В связи с малыми габаритами плиты, отсутствием преднапряжения системы канатов, шагом канатов, превышающим ширину плиты, и податливостью соединения сетки с канатом, в качестве расчетной схемы принята плоская схема, исходя из предположения, что динамическое воздействие от падающей плиты воспринимает один канат. Таким образом, расчетная схема представлена в виде гибкой нити, нагруженной собственным весом и динамической нагрузкой от падающей массы плиты покрытия. Поскольку опорами нити являются элементы стропильной фермы, то опоры были приняты упругоподатливыми (рис. 3).

Для решения поставленной задачи была разработана методика нелинейного динамического расчета весомой гибкой нити при ударном воздействии от падающей массы при упругоподатливых опорах.

На гибкую нить пролетом L , нагруженную собственным весом mg и имеющую первоначальную



Рис. 1. Разрушенная плита покрытия Р-10.

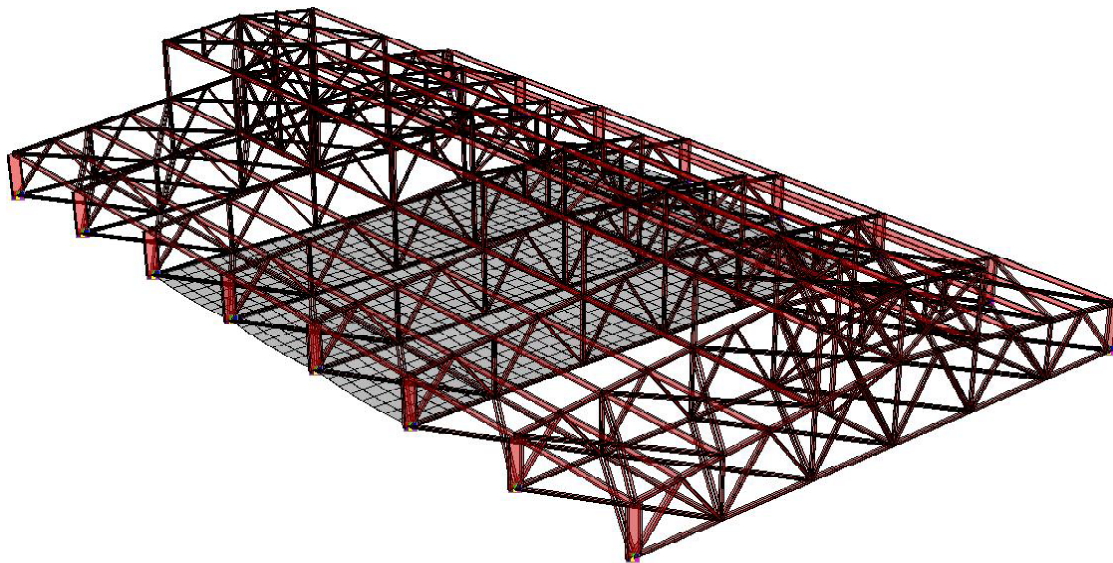


Рис. 2. Пространственная расчетная схема покрытия и защитного экрана.

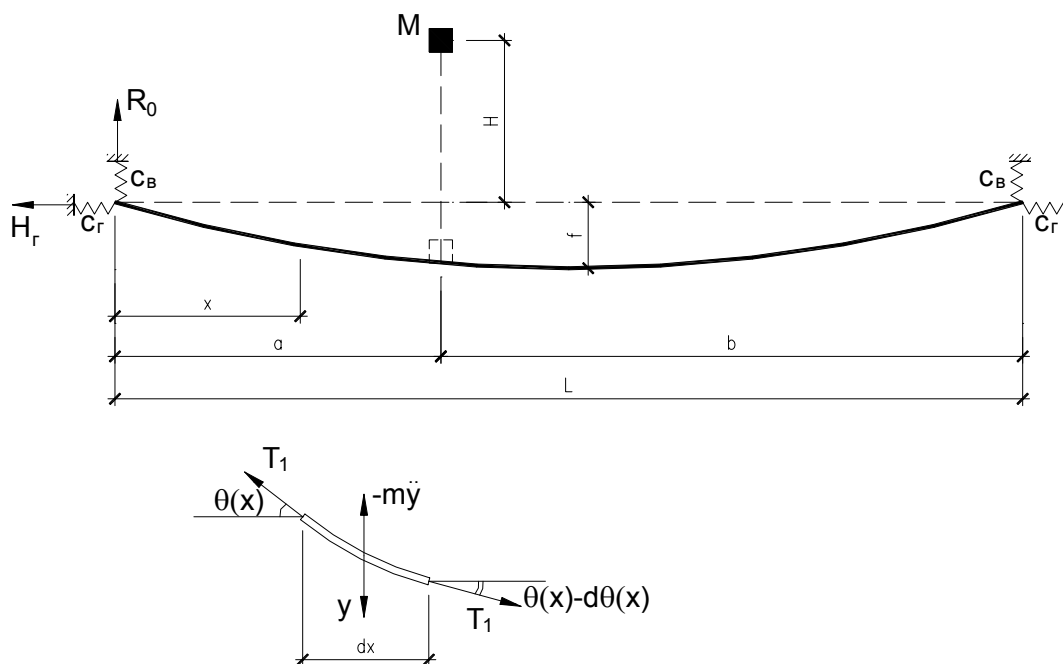


Рис. 3. Расчетная схема нити.

чальную стрелу провисания f , вертикально падает масса M с высоты h (рис. 3). От этого в поперечном сечении нити появляются продольные усилия, различные по длине нити.

В случае падающей массы динамическая нагрузка может быть разделена на два нагружения – динамическая нагрузка от внезапно приложенной силы $P=Mg$, и динамическая нагруз-

ка от сообщения массе M , находящейся на нити, скорости $V_0 = \sqrt{2gh}$. Общее решение будет получено суммированием этих нагружений.

Найдем общее решение $\bar{y}(x,t)$ уравнения колебаний от сообщенной системе скорости V_0 .

Из условия динамического равновесия элемента dx получим дифференциальное уравнение:

$$T_1 \sin \theta - m\ddot{y}dx - T_1 \sin(\theta - d\theta) = 0$$

или

$$T_1 \sin \theta - m\ddot{y}dx - T_1 \sin \theta \cos d\theta + T_1 \cos \theta \sin d\theta = 0 \quad (1)$$

Исходя из малости угла $d\theta \rightarrow 0$, $\sin d\theta = d\theta$, $\cos d\theta = 1$, а также дифференциальной зависимости

$$d\theta = \frac{d^2 y}{dx^2} dx = y_{xx} dx,$$

получим

$$y_{xx} T_1 \cos \theta - m y_{tt} = 0, \text{ или} \\ y_{tt} = c^2 y_{xx}, \quad (2)$$

где $c = \sqrt{\frac{T_1 \cos \theta}{m}} = \sqrt{\frac{H_r}{m}}$ – фазовая скорость деформаций.

Найдем общее решение уравнения (2).

Известно [4, 5, 6], что решение уравнения (2) может быть записано в виде:

$$y(x, t) = (A \cos kx + B \sin kx) \times \sin(\omega t + \mu), \quad (3)$$

где k – волновое число, определяемое из частотного уравнения, ω – угловая частота колебаний

$$\omega = kc = k \sqrt{\frac{H_r}{m}}, \quad \mu - \text{сдвиг фаз (исходя из}$$

отсутствия начальных перемещений $U(x, 0) = 0$, $\mu = 0$).

Подставляя граничные условия задачи: $y(0) = -U_0$, $y'(0) = \operatorname{tg} \theta_0 = -(R_0 / H_r)$, получим

$$y(x, t) = [-U_0 \cos kx - \frac{R_0}{kH_r} \sin kx + \frac{P_n}{kH_r} \varepsilon(x-a) \sin k(x-a)] \sin \omega t, \quad (4)$$

где $\varepsilon(x-a)$ – единичная функция

$$\begin{cases} \varepsilon(x-a) = 1, & \text{при } x \geq a \\ \varepsilon(x-a) = 0, & \text{при } x < a, \end{cases}$$

P_u – сила инерции массы M

$$P_u = -M y_{tt}(a) = \\ = -M k^2 \frac{H_r}{m} \left(U_0 \cos ka + \frac{R_0}{kH_r} \sin ka \right) \quad (5)$$

Поскольку $U_0 = R_0 c_\varepsilon$, заменяя $\xi = \frac{M}{mL}$, $l = kL$, $\alpha = ka$, $\beta = kb$, получаем уравнение (4) в виде:

$$y(x, t) = \\ - \frac{R_0}{kH_r} \times \left[\begin{array}{l} c_\varepsilon kH_r \cos kx + \\ + \sin kx - \xi \lambda \varepsilon(x-a) \times \\ \times [c_\varepsilon kH_r \cos ka + \sin ka] \times \\ \times \sin k(x-a) \end{array} \right] \times \sin \omega t = C_n X_n(x) \sin \omega t \quad (6)$$

Подставляя в уравнение (6) граничное условие $y(L) = U_L = U_0$, получим частотное уравнение (7), из которого определяются собственные числа λ_n и волновые числа κ_n ($\kappa_n = \lambda_n / L$).

$$\sin \lambda - \xi \lambda \sin \beta \lambda \sin \alpha \lambda = \\ = \frac{H_r c_\varepsilon}{L} \lambda (1 + \xi \lambda \cos \alpha \lambda \cos \beta \lambda - \cos \lambda) \quad (7)$$

Решение частотного уравнения (7) в явном виде невозможно, поэтому корни уравнения определяются численными методами.

Рассмотрим начальные условия задачи:

$$y_t(x, 0) = \\ = -V_0 [\varepsilon(x-a) - \varepsilon(L-x) + \varepsilon(a-x)]$$

Скорость перемещения точек определится как

$$V(x, t) = \frac{\partial y}{\partial t} = - \sum_{n=1}^{\infty} C_n \omega_n X_n \cos \omega_n t$$

Согласно схемы Фурье [4], умножаем это выражение на вес $\rho(x) = 1 + \xi L \delta(x-a)$ (где $\delta(x-a)$ – дельта-функция Дирака) и на смежную форму $X_n(x)$ и интегрируем по длине нити:

$$C_n \omega_n \int_0^L \rho(x) X_n(x) X_m(x) dx = \\ = -V_0 \int_0^L -\varepsilon(L-x) + \varepsilon(a-x) dx$$

$$C_n \omega_n \left(\int_0^L X_n^2(x) dx + \xi L X_n^2(x) \right) = -V_0 \xi L X_n(a) \quad (8)$$

Как известно [5], квадрат нормы собственных функций может быть вычислен по формуле:

$$\Delta^2 = \int_0^L X^2 dx = \frac{1}{2k} [kx(X^2 + (X')^2) - XX']_0^L, \quad (9)$$

Обозначая

$A_2 = c_b k H_r$, $A_1 = (A_2 \cos ka + \sin ka) xl$, получим функции формулы (6) в виде:

$$C_n = \frac{R_0}{k_n H_r} \\ X_n(x) = A_2 \cos kx + \sin kx - A_1 \varepsilon(x-a) \sin(x-a) \quad (10)$$

Тогда подставляя функцию X(x) в уравнение (9), получим квадрат нормы собственных функций:

$$\Delta^2 = \int_0^L X^2 dx = \frac{L}{2} \left[\frac{A_2}{\lambda} (1 + \lambda A_2 + A_2 \sin \lambda - \cos \lambda) + (\cos \lambda - A_1 \cos \beta \lambda - A_2 \sin \lambda)^2 - \frac{A_1 A_2}{\lambda} (\cos \beta \lambda + 2\alpha \lambda \sin \alpha \lambda + \cos \alpha \lambda) + \alpha A_1 (2 \cos \alpha \lambda - A_1) - \xi \sin^2 \alpha \lambda - A_2 \xi \cos \alpha \lambda \sin \alpha \lambda \right] \quad (11)$$

Тогда в соответствии с (8) получим

$$C_n = \frac{-V_0 A_{n1} L^2}{c \lambda_n^2 \Delta_n^2} \quad (12)$$

Общее решение тогда окончательно получим в виде:

$$\bar{y}(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\begin{array}{l} A_{n2} \cos \frac{\lambda_n x}{L} + \\ + \sin \frac{\lambda_n x}{L} \\ - A_{n1} \varepsilon(x-a) \times \\ \times \sin \frac{\lambda_n (x-a)}{L} \end{array} \right) \sin \omega_n t \quad (13)$$

Найдем частное решение уравнения колебаний $y^*(x, t)$ для случая внезапно приложенной силы $P=Mg$.

Представляя сосредоточенную силу P как условно распределенную нагрузку

$q(x)=Pd(x-a)$, согласно решений приведенных [5], получим весовую функцию в виде:

$$q_n(t) = \frac{1}{\Delta_n^2} \int_0^L P \delta(x-a) X_n(x) dx = \frac{P}{\Delta_n^2} X_n(a) \quad (14)$$

Решение ищем методом разделения переменных в виде $y^*(x, t) = W(t)X(x)$

$$W_n(t) = \frac{1}{\omega_n} \int_0^t \frac{q_n(\tau)}{m} \sin \omega_n (t-\tau) d\tau = \frac{P X_n(a)}{m \Delta_n^2 \omega_n^2} (1 - \cos \omega_n t) = \frac{A_1 L^2 P}{\xi \lambda_n^3 \Delta_n^2 H_r} (1 - \cos \omega_n t) \quad (15)$$

Тогда частное решение примет вид:

$$y^*(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \frac{A_{n1} L^2 P}{\xi \lambda_n^3 \Delta_n^2 H_r} (1 - \cos \omega_n t) \quad (16)$$

Окончательное общее решение от динамического воздействия падающей массы найдем как сумму общего и частного решений:

$$y(x, t) = \bar{y}(x, t) + y^*(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[C_n X_n(x) \sin \omega_n t + X_n(x) \times \frac{A_{n1} L^2 P}{\xi \lambda_n^3 \Delta_n^2 H_r} (1 - \cos \omega_n t) \right] \quad (17)$$

Максимальный динамический прогиб

$$y_{\max} = y\left(a, \frac{2\pi}{\omega_1}\right) \quad (18)$$

Необходимо отметить, что решение подобной системы при малой стреле провисания нити $\frac{f}{L} < \frac{1}{10}$ как на статическую, так и на динамическую нагрузку должно осуществляться в геометрически нелинейной постановке, поскольку величина продольных усилий существенно изменяется при малейших деформациях системы. Полученное решение $y(x,t)$ зависит от продольного усилия, действующего в ветвях нити, а оно, в свою очередь, зависит от деформации системы. Решение может быть получено методом итераций, на каждом шаге которых вычисляются динамические перемещения нити (18), потом, исходя из условий равновесия и закона Гука, вычисляются усилия в ветвях нити и сравниваются со значением усилия предыдущей итерации. Если разница между усилиями двух смежных итераций велика, производится следующая итерация, усилие в которой принимается как полусумма двух предыдущих. Краткая блок-схема решения задачи представлена на рис. 4.

По предложенной методике выполнен расчет защитного экрана. Падающая масса была принята $M=170$ кг. Высота падения массы для каждого каната принималась равной высоте от нижнего пояса до верха прогона покрытия.

Для определения коэффициентов податливости опор c_0 и c_2 был произведен расчет пространственной схемы покрытия здания в пределах одного связевого отсека (рис. 2) на статическую единичную нагрузку, приложенную в местах закрепления каната. В каждом случае от действия единичной нагрузки определяем перемещения δ точки приложения нагрузки в направлении действия этой нагрузки. Расчет производился для каждого каната.

В соответствии с предложенным проектом по длине нижнего пояса размещается 39 рядов канатов. Нумерация точек крепления канатов на половине длины фермы представлена на рис. 5.

Для каждого каната были найдены усилия в ветвях каната в соответствии с методикой, представленной выше, при падении массы в середине каната при следующих исходных данных:

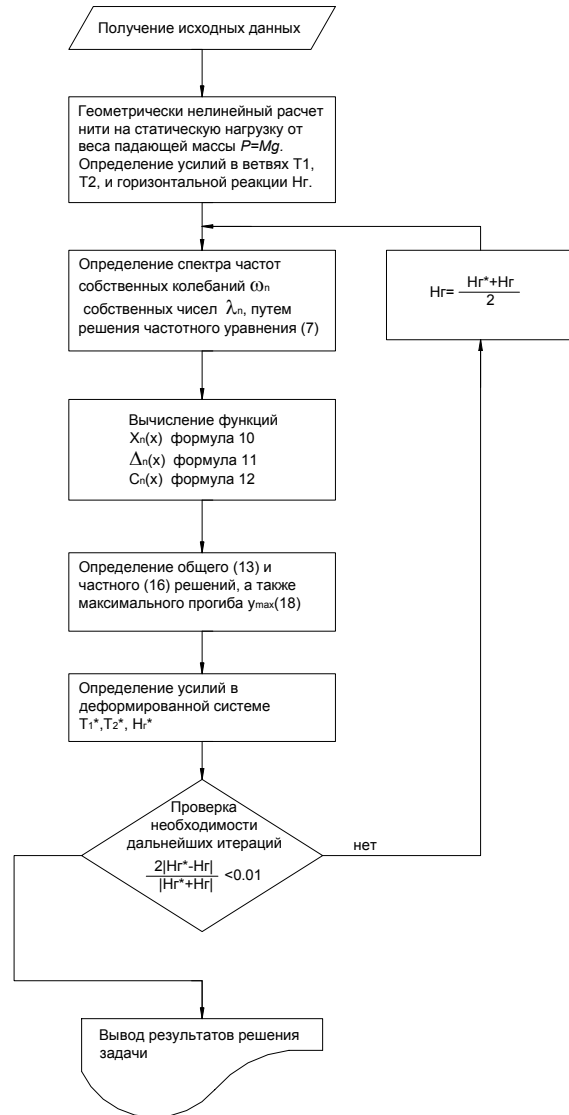


Рис. 4. Блок-схема решения задачи нелинейного динамического расчета гибкой нити при ударном воздействии падающей массы.

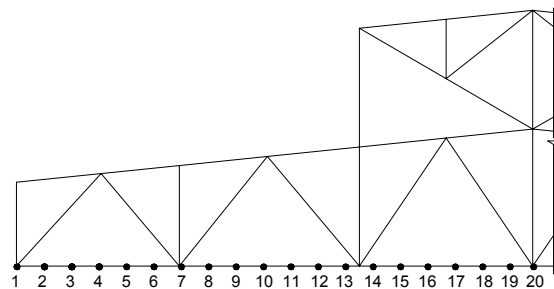


Рис. 5. Нумерация канатов по длине фермы.

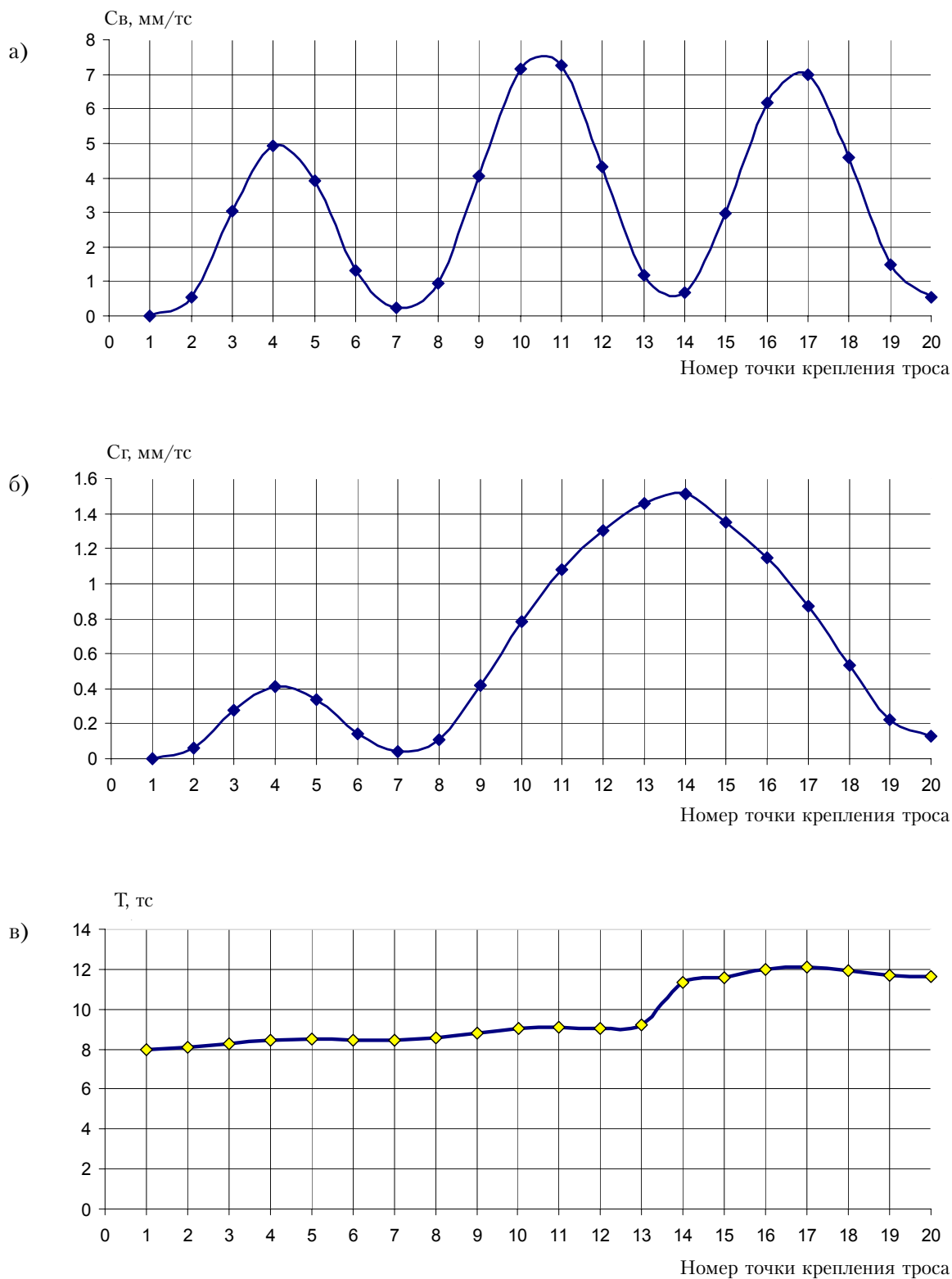


Рис. 6. Диаграммы изменения расчетных величин для рассматриваемых канатов:
 а) Изменение величины коэффициента вертикальной податливости опор C_v от места расположения каната;
 б) Изменение величины коэффициента горизонтальной податливости опор C_r от места расположения каната;
 в) Изменение усилия в ветвях каната T от места расположения каната.

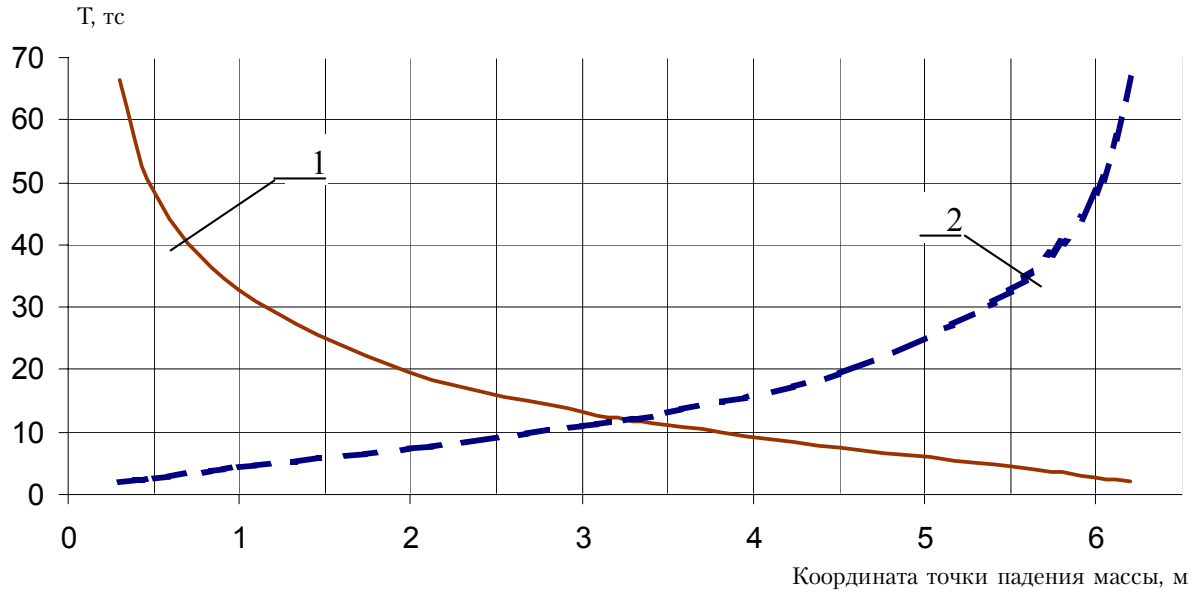


Рис. 7. Диаграммы изменения продольных усилий в ветвях канатов при различных координатах падения массы.

- 1) Усилие в левой ветви каната;
- 2) Усилие в правой ветви каната.

площадь сечения каната $F=18,05 \text{ мм}^2$ (ГОСТ 2688-80 [2]), модуль упругости каната без предварительной вытяжки $E=1,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, пролет $L=6,5 \text{ м}$, координата падения массы $a=3,25 \text{ м}$, падающая масса $M=170 \text{ кг}$, распределенная масса каната и уложенной на него сетки $m=3 \text{ кг/м}$. Результаты расчетов отражены в диаграммах, приведенных на рис.6.

Как видно из рис. 6, коэффициент вертикальной податливости C_v приобретает максимальные значения к серединам панелей фермы и резко уменьшается к узлам, коэффициент горизонтальной податливости C_r приобретает максимальные значения в серединах пролетов между расположенными горизонтальными связями по нижним поясам ферм. Усилия в ветвях канатов изменяются в пределах от 8,0 тс до 12,12 тс, постепенно увеличиваясь при возрастании высоты падения массы, с учетом изменения коэффициента вертикальной податливости. Так, наиболее невыгодным, с точки зрения падения массы, оказался канат №17, располагающийся в середине 3-ей панели фермы и имеющий максимальный коэффициент вертикальной податливости опор. Расчетное продольное усилие в канате №17 составляет 12,12 тс.

Характер влияния координаты падения массы M по длине нити на расчетное продольное усилие в левой и правой ветви каната, считая от точки падения массы, показан на диаграмме рис.7.

Как видно из диаграммы на рис. 7, усилия в одной из ветвей каната увеличиваются при приближении точки падения массы M к одной из опор, а в другой соответственно уменьшается. Это связано с увеличением жесткости системы на восприятие вертикальной нагрузки от середины к краям, и, как следствие, увеличения динамического эффекта падающей массы. Таким образом, наиболее благоприятной точкой падения массы является середина каната.

Анализ диаграмм, представленных на рис. 7 и рис. 6, в, показывает, что расчетное усилие в канате изменяется от 8,00 тс (при падении массы в середину каната №1) до 48,3 тс (при падении массы на расстоянии 0,5 м от фермы каната № 17). Расчетное разрывное усилие каната ЛК-Р 6,9-Г-I (160) по ГОСТ 2688-80 составляет $[T_p]=2,88 \text{ тс}$. Таким образом, превышение напряжений в ветвях каната может составлять от 2,77 до 16,77, что является недопустимым.

Увеличение поперечного сечения каната в данном случае лишено смысла, поскольку проведенные расчеты НДС элементов ферм при действии особого сочетания нагрузок показали, что напряжения в стержнях превышают расчетное сопротивление в несколько раз. Такой эффект в первую очередь связан с горизонтальным внеузловым приложением нагрузки к элементам нижнего пояса ферм. Увеличение поперечного сечения каната приведет к повышению жесткости препятствия для падающей массы, и, как следствие, к повышению динамического эффекта и внутренних усилий в канате и элементах стропильной фермы. Перемещение защитного экрана в область верхнего пояса фермы удовлетворительных результатов также не дало.

Таким образом, применение системы гибких нитей, закрепленных к стропильным фермам покрытия, как конструкции защитного экрана использоваться не может. В результате была предложена система защитного экрана из сплошного деревянного настила, устроенного в межпрогонном пространстве. Такое решение

дало возможность минимизировать динамический эффект от аварийной нагрузки, выполнить требования норм [1] относительно прочности существующих конструкций покрытия, а также возможность производства работ по замене кровли и демонтажу аварийных плит с присутствием на кровле людей и оборудования.

Литература

1. СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат. - 1990. - 96 с.
2. ГОСТ 2688-80. Канат двойной свивки типа ЛК-Р/ Гос. стандарт СССР. - М.: Издательство стандартов, 1980. - 12 с.
3. ГОСТ 514-41. Железобетонные плиты покрытия. Технические условия. / Госстрой СССР. – М. – 1960. – 16с.
4. Шевченко Ф.Л., Утілін Г.М. Динамічні задачі стержньових систем. – К.: ІСДО, 1995. – 100 с.
5. Шевченко Ф. Л. Динамика упругих стержневых систем: Учебное пособие. – Донецк: ООО “Лебедь”, 1999. – 268 с.
6. Василенко Н.В. Теория колебаний. – К.: Вища шк., 1992, – 430с.

Мушанов Володимир Пилипович працює завідувачем кафедри "Теоретична і прикладна механіка", проректором з наукової роботи Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член міжнародної організації "По мостам і будівельним конструкціям" та міжнародної асоціації "Просторові конструкції", аудитор системи сертифікації УкрСЕПРО. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Денисов Євген Валерійович є асистентом кафедри "Теоретична і прикладна механіка" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: динаміка споруд, діагностика будівельних конструкцій.

Зубенко Ганна Василівна є асистентом кафедри "Теоретична і прикладна механіка" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: динаміка споруд, розрахунок і проектування просторових конструкцій.

Мушанов Владимир Филиппович работает заведующим кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе. Член международной организации "По мостам и строительным конструкциям" и международной ассоциации "Пространственные конструкции", аудитор системы сертификации УкрСЕПРО. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Денисов Евгений Валериевич является ассистентом кафедры "Теоретическая и прикладная механика" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: динамика сооружений, диагностика строительных конструкций.

Зубенко Анна Васильевна является ассистентом кафедры "Теоретическая и прикладная механика" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: динамика сооружений, расчет и проектирование пространственных мембранных конструкций.

Mushchanov Volodymyr Pylypovych is a Principal of Theoretical and applied mechanics department, vice-rector of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of International Association for Bridge and Structural Engineering, and member of International Association of Spatial Structures, auditor of certification scheme UKRSEPRO. His research interests include the reliability theory, calculation, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

Denisov Yevgen Valeriyovych is an Asistant lecturer of Theoretical and applied mechanics department of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. His research interests include the dynamics of structures, diagnostics of building structures.

Zubenko Ganna Vasylivna is an Assistant lecturer of Theoretical and applied mechanics department of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Her research interests include the dynamics of structures, calculation and designing of spatial metal structures.